УДК 004.93'1;004.932

А.М. Недзьведь, Д.А. Гончаров, С.В. Абламейко
Объединенный институт проблем информатики НАН РБ, г. Минск
nedzveda@newman.bas-net.by, goncharovda@gmail.com

Методика выделения топологических признаков на трехмерных изображениях

Представлена новая методика получения и анализа топологических характеристик для последующей классификации на трехмерных изображениях. Для получения топологических структур использовались трехмерные дистанционные карты, анализ применялся с помощью рассмотрения совместных свойств скелета, границы и выпуклой оболочки объекта.

Введение

Трехмерные объекты на изображениях отличаются большой вариабельностью форм и структур, характеристика которых является сложной задачей. Характеристика структур является очень важной проблемой в задачах исследования материалов, мониторинга заболеваний, контроля качества.

Выделение средних линий объектов (скелетизация) является важным этапом в таких задачах для последующих вычислений различных (геометрических, топологических) характеристик объекта, а также для описания и распознавания объектов. В медицинских приложениях скелетизация может использоваться для мониторинга заболеваний путем контроля изменений на изображениях.

В большом количестве работ, посвященных проблеме выделения топологических признаков, рассматриваются такие топологические примитивы: окрестность, связность, путь, полость и т.д. [1]. Они, безусловно, важны, однако для достаточно сложных объектов получается слишком большая дескрипторная часть, что осложняет анализ объектов.

В нашей статье рассматриваются более сложные топологические характеристики, которые позволяют достаточно полно описать особенности сложных ветвящихся объектов.

В основе вычисления использовался скелет, который имеет следующие основные свойства:

– сохраняет топологию оригинального объекта;

– расположен в центральных точках геометрической области объекта;

– все воксели скелета связаны друг с другом;

– сохраняется после вращения изображения (по крайней мере для угла, который является кратным $\pi/2$);

– имеет ширину равную 1 вокселю;

– для каждого вокселя скелета известно расстояние до границы объекта.

Последнее свойство основано на построении скелета с помощью дистанционных карт и позволяет эффективно вычислить топологические характеристики объекта, как будет показано далее.

Целью данной работы является разработка методики получения и анализа топологических характеристик с помощью рассмотрения совместных свойств скелета, границы и выпуклой оболочки объекта.

Трехмерные дистанционные карты

Рассмотрим n-мерное бинарное изображение I, для которого определены множества вокселей (элементов объемного изображения) объекта O и вокселей фона B. Пусть $x \in N^n$ – некоторая координата, тогда через $I(x)$ обозначим значение вокселя с координатой x в изображении I.

Дистанционное преобразование – преобразование, которое каждой точке изображения ставит в соответствие расстояние в заданной метрике до ближайшей точки фона [2]. Формальная запись:

$$I_d(x) = \begin{cases} 0, если\, I(x) \in B \\ \min(\|x - y\|, \forall I(y) \in B, если\, I(x) \in O \end{cases}, \quad (1)$$

где $\|x - y\|$ – некоторая метрика.

Также существует понятие знакового дистанционного преобразования. В этом случае дополнительно вокселям фона ставится в соответствие число, противоположное расстоянию до ближайшей точки объекта. То есть:

$$I_d(x) = \begin{cases} -\min(\|x - y\|, \forall I(y) \in O, если\, I(x) \in B \\ \min(\|x - y\|, \forall I(y) \in B, если\, I(x) \in O \end{cases}. \quad (2)$$

Точки хребтов на дистанционной карте соответствуют вокселям, которые находятся в центре объекта. Они выступают в качестве потенциальных кандидатов точек скелета. Ниже перечислены некоторые подходы, использующиеся для поиска вокселей-кандидатов:

–*методы утоньшения*, использующие дистанционную карту для определения приоритета выбора вокселей для удаления [3];

–*методы поиска градиента* [4], предполагающие выявление районов неоднородного градиента и маркировки таких вокселей в качестве кандидатов на удаление;

–*методы вычисления дивергенции* используют в [5] в качестве функции приоритета для удаления «простых» вокселей с малым значением дивергенции;

–*методы адаптивного утоньшения* характеризуются сравнениями между значением дистанционной карты в вокселе и средним значением дистанционной карты его соседей [6].

Множество вокселей-кандидатов обычно имеет большую размерность и следующий шаг, как правило, заключается в уменьшении их количества.

Для связности большинство алгоритмов используют минимальные остовные деревья [7], кратчайшие пути [9] или другие алгоритмы на графах. Некоторые методы сначала используют объединение, затем удаление вокселей путем нахождения кратчайшего пути в связанном множестве [4].

Основное преимущество этих методов в том, что вычисление дистанционной карты происходит очень быстро (за линейное время от числа вокселей), что очень важно во многих приложениях.

Выделение топологических характеристик

Топологические характеристики описывают форму объектов и их морфологическую взаимосвязь. Наиболее яркими и интересными из них являются следующие: число Эйлера, характеризующее вложенность объектов внутри измеряемого; выпуклый

периметр, соответствующий периметру минимального выпуклого полигона, в который вписывается объект; количество дыр или отверстий внутри объекта.

Покажем, как можно эффективно вычислить топологические характеристики с помощью построенных скелета и контуров.

Иногда встречаются объекты, которые чувствительны только к определенному типу шаровидности, который свидетельствует о локальной нерегулярности и вычисляется как отношение объема объекта к объему эквивалентного шара:

$$globosity = \frac{3 \times volume}{4 \times \pi \times radius^3}. \tag{4}$$

Здесь радиус можно посчитать как половину максимума расстояния между вокселями скелета. Радиус можно вычислить за линейное время, сравнивая все воксели сегмента скелета с концевыми вокселями.

Еще одной характеристикой, описывающей форму, является шарообразность, которая определяется как отношение радиусов описанной и вписанной окружностей (рис. 1):

$$sphericity = \frac{R_{in}}{R_{out}}, \tag{5}$$

где R_{in} – внутренний радиус; R_{out} – внешний. Внутренний радиус берется как максимум значения толщины сегмента. Обозначим точку, в которой достигается максимум толщины, как P_{max}. Внешний радиус берется как максимум расстояния от P_{max} до границы объекта.

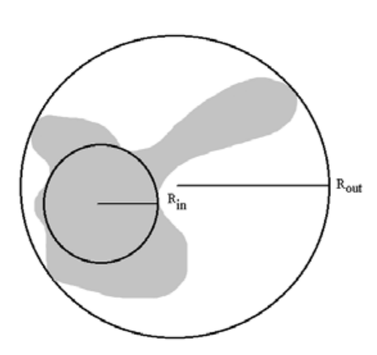


Рисунок 1 – Внутренний и внешний радиус объекта

Несмотря на большое количество характеристик, описывающих форму объекта, для характеристики выпуклости (convexity) используется отношение обычного объема к выпуклому (рис. 2):

$$convexity = \frac{volume}{convex\,volume}. \tag{6}$$

Если объект выпуклый, эта величина будет равна 1, при появлении впадин она уменьшается. Здесь объем представляет собой сумму площадей объекта на каждом слое с учетом масштабирующего коэффициента.

Похожая величина используется при изучении плотности объекта. Называется она «целостность» (solidity) и определяется как отношение обычной и выпуклой площади поверхности (рис. 2):

$$solidity = \frac{area}{convex\,area}. \tag{7}$$

Здесь площадь поверхности вычисляется как сумма периметров контуров объекта на каждом слое. Если объект целый и не имеет дыр и впадин, эта величина равна единице, при их появлении она уменьшается.

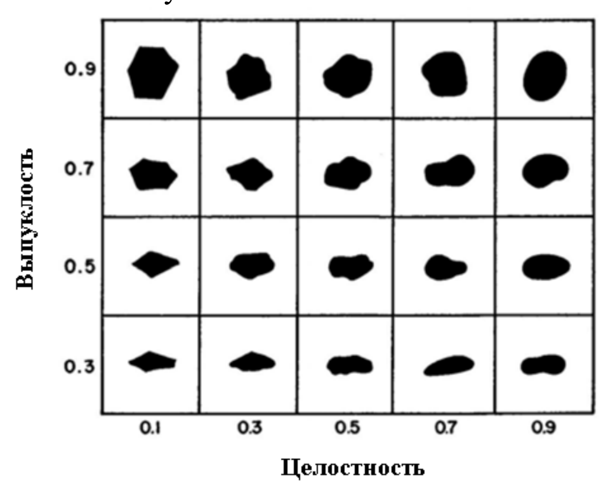


Рисунок 2 – Объекты разной выпуклости и целостности

Когда анализируются изображения со многими объектами, например, параметры формы вычисляются индивидуально, описание общей формы выполняется на основе индивидуальных параметров, например таких, как стандартное отклонение площади, основная и дополнительная оси, периметр и округлость или среднее компактности, элонгации, периметра и площади. Все эти величины предназначены в основном для описания площадных объектов типа клеток.

Для протяженных объектов, например сосудов и волокон, в продольном сечении многие измерения имеют свою специфику (рис. 3), например длина обычного объекта определяется как максимальное расстояние между двумя точками объекта, в то же время основной физический смысл имеют длина и толщина развернутого, вытянутого волокна. Такая длина соответствует размерам средней линии, а толщина – минимальному расстоянию между двумя граничными точками внутри объекта и может определяться как

$$fibre\,length = skeleton\,length\,. \tag{8}$$

Длина скелета подсчитывается следующим образом. Перебираются последовательно все воксели скелета с одного конца до другого. Пусть *(dx,dy,dz)* – смещение текущего вокселя от предыдущего.

Следующая таблица описывает, насколько изменяется текущая длина скелета, в зависимости от расположения соседних вокселей скелета.

Таблица 1 – Процедура подсчета изменений текущей длины скелета.

Условие взаимного расположения	Изменение текущей длины скелета
$abs(dx)+abs(dy)+abs(dz)==1$	$+1$
$abs(dx)+abs(dy)+abs(dz)==2$	$+\sqrt{2}$
$abs(dx)+abs(dy)+abs(dz)==3$	$+\sqrt{3}$

В отличие от двухмерного случая, где толщина волокна является частным от деления площади на длину, в трехмерном случае из-за дискретности между слоями можно говорить о максимальной, минимальной и средней толщине волокна:

$$\max imum\; fibre\, width = \max\{v \mid v \in skeleton\}\,; \tag{9}$$

$$\min imum\; fibre\, width = \min\{v \mid v \in skeleton\}\,; \tag{10}$$

$$average\; fibre\, width = avg\{v \mid v \in skeleton\}\,. \tag{11}$$

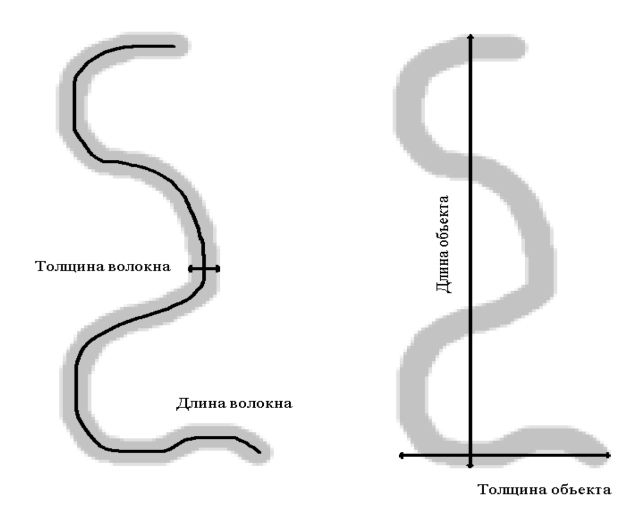


Рисунок 3 – Отличие между линейными характеристиками объекта и волокна

На основе разницы между этими понятиями определяют ряд новых параметров, например закрученность (curl) волокна – отношение длины объекта к длине волокна:

$$curl = \frac{length}{fibre\,length}. \tag{12}$$

Здесь *fibre length* определяется по формуле (8), а в качестве *length* берется расстояние между концами сегмента скелета.

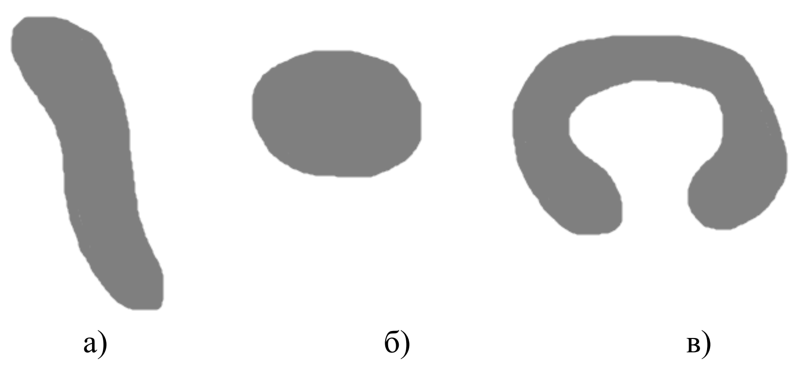
Помимо перечисленных, еще одной топологической характеристикой является элонгация (elongation), которая определяется как отношение длины и ширины объекта (рис. 4):

$$elongation = \frac{width}{length}, \tag{13}$$

где *width* – ширина описанного прямоугольника; *length* – его длина.

Преимуществом использования скелета вместо исходного объекта является меньшее количество операций, необходимое для подсчета ширины и длины прямоугольника.

Величина этого параметра меняется от 0 до 1, если она равна 1, то объект имеет квадратную или круглую форму.



а) б) в)

Рисунок 4 Объекты с разной элонгацией:
а) высокая элонгация; б) и в) низкая элонгация

Данное определение элонгации не может качественно описать форму искривленных объектов, для которых длина не соответствует основной оси. В таком случае элонгация определяется как отношение объема объекта к кубу его настоящей толщины, которая соответствует максимальной области утоньшения:

$$elongation = \frac{6 \times volume}{d^3}, \quad (14)$$

где d – максимальное значение толщины на рассматриваемом сегменте скелета.

На практике большой информативностью обладают комбинации параметров между различными объектами, являющиеся составляющими одного целого, так называемые межобъектные характеристики. Для описания таких комбинаций можно определить следующие характеристики: ветвистость (branchiness), закрученность (curliness), хвостатость (tailness), закрученность хвостов (tail curliness), нормированная хвостатость (tails ratio).

Ветвистость и закрученность описывают сложность формы скелета. Они определяются как отношение числа узлов или сегментов скелета к длине скелета соответственно. Сегменты скелета определяются как фрагменты, ограниченные узлами или точками окончания скелета:

$$branchiness = \frac{count(nodes)}{skeleton\,length}, \quad (15)$$

$$curliness = \frac{count(nodes)}{count(segments)}. \quad (16)$$

Определение хвостов позволяет определить характеристики для описания зависимости особенностей окончания объекта к его сложности. Дело в том, что в реальной жизни объект может иметь не только отдельные ветви, но и пересекающиеся структуры, образующие замкнутую сеть. Для определения таких особенностей и вводятся определения хвостатости, закрученности хвостов и нормализованной хвостатости. Они определяются как:

$$tai\ln ess = \frac{count(tails)}{skeleton\,length}, \quad (17)$$

$$tailcurliness = \frac{count(tails)}{count(segments)}, \quad (18)$$

$$tailsratio = \frac{length(tail)}{skeleton\,length}. \quad (19)$$

При этом хвост определяется только своими концевыми вокселями. Для того, чтобы сегмент был хвостом, необходимо, чтобы один концевой воксель имел не больше одного соседа в 26-окрестности. Длина хвоста из формулы (19) подсчитывается по тем же правилам, что и длина скелета из формулы (8).

Выводы

Предложенная методика позволяет на основе скелета вычислить топологические характеристики структуры объекта. Широкий набор предлагаемых характеристик позволяет не только описать сложность объекта, но и в случае динамических исследо-

ваний определять характеристики роста и изменения объекта в зависимости от различных физических воздействий, например по ветвистости можно судить о равномерности плотности ткани или материала, в котором растет структура. Это особенно важно при изучении различных коммуникационных особенностей (снабжение кровью опухоли, изменение электрической активности нервной ткани, влияние магнитных полей на доменные структуры и т.д.). Данная методика позволяет проводить мониторинг роста структур на 3D изображениях.

Полученные результаты будут способствовать развитию диагностического программного обеспечения лучевых методов для правильного расчета данных по динамике регрессии опухолевых образований, оптимизации принятия решения по вопросам лечения. Определение правильного пути лечения позволит значительно снизить стоимость лекарств и лечебных процедур. Работа направлена на улучшение информационного содержания данных первичного диагноза, а также для обеспечения комфорта специалистам-медикам в ходе анализа результатов обследования. Работа частично сопровождалась проектами МНТЦ B-1682 и B-1636.

Литература

1. Eckhardt U. Topologies for the Digital Spaces Z^2 and Z^3 / U. Eckhardt, L.J. Latecki // Computer Vision and Image Understanding (CVIU) 90. – 2003. – P. 295-312.
2. Borgefors G. Distance Transformations in Arbitrary Dimensions / G. Borgefors // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – 1984. – Vol. 27. – P. 321-345.
3. Couprie M. Discrete Bisector Function and Euclidean Skeleton / M. Couprie, R. Zrour // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Vol. 3429.
4. Bitter. Penalized-Distance Volumetric Skeleton Algorithm / Bitter, A.E. Kaufman, M. Sato // IEEE TVCG. – 2001. – № 7(3).
5. Bouix S. Divergence-Based Medial Surfaces / S. Bouix, K. Siddiqi // ECCV. – 2000, Springer-Verlag. – № 1842. – P. 603-618.
6. Gagvani N. Parameter Controlled Volume Thinning / N. Gagvani, D. Silver // Graphical Models and Image Processing. – 1999. – № 61 (3). – P. 149-164.
7. Sundar H. Skeleton Based Shape Matching and Retrieval / H. Sundar, D. Silver, N. Gagvani [etc.] // Proc. Shape Modeling Int'l. – 2003.
8. He T. Reliable Path for Virtual Endoscopy: Ensuring Complete Examination of Human Organs / T. He, L. Hong, D. Chen [etc.] // IEEE Trans. Visualization and Comp. Graphics. – 2001. – № 7 (4). – P. 333-342.

А.М. Недзьведь, Д.А. Гончаров, С.В. Абламейко

Методика виділення топологічних ознак на тривимірних зображеннях

Представлена нова методика отримання та аналізу топологічних характеристик для подальшої класифікації на тривимірних зображеннях. Для отримання топологічних структур використовувалися тривимірні дистанційні карти, аналіз застосовувався з допомогою розгляду спільних властивостей скелета, межі та опуклої оболонки об'єкту.

A.M. Nedzved, D.A. Goncharov, S.V. Ablameyko

Technique for separation of topological features on the three-dimensional images

The paper is devoted to the problem of obtaining and analyzing the topological **features** for the subsequent classification of three-dimensional images. To obtain the topological structures, we used three-dimensional distance maps, the analysis applied by considering the joint properties of the skeleton, the boundary and the convex hul of the object.

Статья поступила в редакцию 22.06.2011.